

特集 産業応用ライダー

車載ライダーの動向

鷲尾 邦彦

パラダイムレーザーリサーチ (〒195-0072 東京都町田市金井 7-7-35)

Trends in automotive LiDARs

Kunihiko Washio

Paradigm Laser Research, 7-7-35 Kanai, Machida, Tokyo 195-0072

(Received June 17, 2022; revised July 26, 2022; accepted August 8, 2022)

A brief overview on the market and technology trends in automotive 3D LiDARs is given. Emphasis is placed on semi-solid-state LiDARs and all solid-state LiDARs toward advanced passenger cars with conditional driving automation of Level 3 or high driving automation of Level 4. Several recent examples of passenger cars equipped with LiDARs and automotive LiDARs adopted for passenger cars are shown in tables. Recent development trends on non-mechanical-scanning-type, all solid-state LiDARs are also briefly explained.

キーワード：ライダー，車載，3次元，動向，走査

Key Words: LiDAR, Automotive, 3-Dimension, Trends, Scanning

1. はじめに

3次元ライダーは、カメラやレーダーでは識別困難な遠方に存在する種々の物体の形状や移動体の移動速度などを迅速に把握することに適しており、自動運転車用センサー群にとって要のセンサーになると考えられている。

米国 DARPA (国防高等研究計画局) の主催により 2005 年にネヴァダ州モハーヴェ砂漠において実施された自動走行に関するコンペでは、2次元ライダー (SICK LMS-291) を 5 個搭載した Stanford 大学の自動運転車 Stanley が優勝したが¹⁾、同年に、64 個の半導体レーザーを搭載した 360° 旋回型 64 ビームの 3次元ライダーが Velodyne 社により開発され、その後まもなくして、これに改良を加えた高性能な Velodyne HDL-64E が出現した。米国 DARPA の主催により、カリフォルニア州の空軍基地において 2007 年に実施された市街地を模した自動走行のコンペ (Urban Challenge) では、優勝した Tartan Racing (Carnegie Mellon 大学と GM 社との連合チーム) 及び 2 位となった Stanford Racing チームを含め、合計 12 チームの自動運転車の屋根にこの HLD-64E が搭載されていた²⁾。

2009 年には、Google 社が自動運転車の開発チームを秘密裏に発足させたが、これが後に同社からスピンオフした Waymo 社へと発展した¹⁾。2009 年の Google におけるチーム発足以降、Waymo 社の公道での総走行距離は、2020 年 1 月には 2,000 万マイル (約 3,200 万 km) に達した^{†1)}。なお、同社は 2018 年に公道での総走行距離 1,000 万マイルを達成しており、わずか 1 年で総走行距離を倍増させた。同社は、2020 年からアリゾナ州の人口 30 万人未満の都市 Chandler にて、自動運転車によるタクシーサービスを提供している。

^{†1)}K. Wiggers: Waymo's autonomous cars have driven 20 million miles on public roads, Jan. 6, 2020, <https://venturebeat.com/2020/01/06/waymos-autonomous-cars-have-driven-20-million-miles-on-public-roads/> (Accessed 2022.6.6)

Waymo 社の自動運転車の屋根には、恐らく自社開発によると思われるマルチビーム 360° 旋回型ライダーが搭載されている^{†2}。

2022 年 6 月には、これまで長年にわたりサンフランシスコにて自動運転車の公道走行試験を行ってきた GM 社傘下の Cruise 社が、その公道走行実績が公的に評価され、大都市では始めてとなる、乗客から運賃が得られる有料のタクシー運行ビジネスを開始できることになった^{†3}。同社の自動運転車は、Chevrolet Bolt というモデルの電気自動車をベースにしており、この自動運転車の屋根には、Velodyne HDL-64E よりはかなり小型な、360° 旋回型のライダーが 5 個程度搭載されている^{†4}。

無人の自動運転車は、比較的低速度での商品配達サービス用として、既に営業に使用されている。Nuro 社の第 3 世代の配達サービス用自動運転車 R3 は、重量約 227 kg まで積載でき、また 46.7°C までの加熱や -5.6°C までの冷蔵が可能であり、最大走行速度は 72 km/h までが可能である^{†5}。この配達サービス用自動運転車の屋根及び側面などに総個数は不明であるが、小型な 360° 旋回型のライダーが複数搭載されている。

自動運転車の普及による米国経済への寄与は、混雑解消による生産性向上、交通事故削減、燃費節減などにより、総額約 1.3 兆ドルに達するであろうと、2013 年に Molgan Stanley 社により報告された³⁾。この報告書によれば、2022 年頃までには完全自動運転が実現でき、2023 年からは完全自動運転の普及期に入るとであろうと予測されていたが、後述するごとく、この完全自動運転の将来予測はかなり楽観的であったことが分かる。

Velodyne HDL-64E は、3 次元データ取得性能が高かったが、総重量が 13 kg 以上と重く、かつ価格が 8 万ドル程度と極めて高価であったため、自動運転車の普及のためには、ライダーの小型・低価格化が必須であると考えられ、2016 年には Velodyne 社は測定可能距離 200 m で総重量 600 g の小型な 360° 旋回型ライダー VLP-32A を開発し、自動車業界向けの大量生産時には価格を 2 桁程度低減した単価 500 ドルでの提供が可能であると発表した⁴⁾。このような背景の下、2016 年頃までには、車載用ライダー技術の開発を目指して、多くのスタートアップ企業が参入し、例えば OPA (Optical Phased Array) 技術の開発により、メカレスの全固体型ライダーが実現でき、量産時には 250 ドルの小型で安価な車載ライダーを提供できる可能性があると言っていた Quanergy 社の企業価値は、一時、15.9 億ドルと評価されたこともある⁴⁾。

360° 旋回型ライダーは、機械式ライダーであり、回転摩擦等による寿命の問題や耐震性が劣るという課題があるため、光源や検出器などは固定し、小型光学部品の回転や MEMS 等の微振動によって光軸を走査する半固体型ライダーや、可動部が全くない全固体型ライダーの開発が活発化している。

このような半固体型ライダー及び全固体型ライダー用には、測距方式に関しては、パルスレーザーを用いるダイレクト ToF (Time of Flight) 並びに変調した連続波を用いる FMCW (Frequency-Modulated Continuous Wave) 及び RMCW (Random-Modulation Continuous Wave) などの諸方式が開発されている。レーザーの種類に関しては、EEL (Edge-Emitting Laser)、VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Lasers)、ファイバレーザーなどの多種が採用されている。またレーザー波長に関しては、NIR (Near Infrared) 域の 905 nm などや、SWIR (Short-Wave Infrared) 域の 1,550 nm などが採用されている。また、走査方式については、2 次元走査、1 次元走査と 1 次元フラッシュの併用、2 次元フラッシュなどの諸方式が採用されている。また光検出器については、p-i-n フォトダイオードや、APD (Avalanche Photodiode)、SPAD (Single-Photon Avalanche Photodiode)、Si-PM (Silicon Photomultipliers) などの種々のものが採用されている。これらの組合せによる

^{†2}R. Amadeo: Google's Waymo invests in LIDAR technology, cuts costs by 90 percent. Waymo is developing hardware and software to make the self-driving car a reality, Jan. 10, 2017, <https://arstechnica.com/cars/2017/01/googles-waymo-invests-in-LiDAR-technology-cuts-costs-by-90-percent/> (Accessed 2022.6.7)

^{†3}J. Oliva: GM's Cruise is the first driverless taxi operating in a major US city. A fleet of 30 Chevrolet Bolt taxis will be operating in San Francisco, California, June 04, 2022, <https://www.motor1.com/news/590053/gm-cruise-driverless-taxi-california/> (Accessed 2022.6.6)

^{†4}A. Krush: Why making driverless cars is hard - and why you may have to wait indefinitely for them, May 23, 2019, <https://www.objectstyle.com/machine-learning/state-of-driverless-car-software-2019> (Accessed 2022.6.6)

^{†5}M. Gauthier: Nuro introduces third-gen autonomous delivery vehicle, features sleeker styling and external air bag, Jan. 12, 2022, <https://www.carscoops.com/2022/01/nuro-introduces-third-gen-autonomous-delivery-vehicle-features-sleeker-styling-and-external-air-bag/> (Accessed 2022.6.6)

ライダー構成の具体化には多様なアプローチがあり、それら多様なアプローチによる車載ライダーについて、これまでに多くの解説がなされている⁵⁻¹¹⁾。

360° 旋回型機械式ライダーは技術がかなり成熟しており、ロボタクシー用や商品配達サービス用ロボカーなどに搭載されているものの、価格、寿命及び外観などの観点から、大量生産されている自家用乗用車への搭載は困難であると考えられるので、ここでは360° 旋回型機械式ライダーに関する説明は省き、半固体型ライダー及び全固体型ライダーに的を絞って、それらの市場動向及び技術動向に関して解説する。

2. ライダーの市場動向

2.1 自動運転車の市場予測

自動車へのライダーの搭載数は、自動運転車のレベルによって異なり、自動運転車のレベルが高くなるほどライダー搭載数が増加するものと考えられるので、まず自動運転車の市場動向についてその概要を把握しておく必要がある。

自動運転車のレベルは、国際規格 ISO/SAE PAS 22736 (SAE J3016 と同等) で定められている¹²⁾。これによれば、レベル0：自動運転なし、レベル1：運転支援、レベル2：部分的自動運転、レベル3：条件付自動運転、レベル4：高度自動運転、レベル5：完全自動運転、である。ドライバーによる監視が常時必要な場合はレベル2以下であり、レベル3以上ではシステムによる監視がなされる。レベル3では、システムからの介入要求に対して、ドライバーが適切に対応することが必要である。レベル4では、特定条件化において、システムが全ての運転タスクを実施する。レベル5では、常にシステムが全ての運転タスクを実施する。

Waymo 社、Gruiuse 社、Argo 社、Aurora 社等によるロボタクシーや商品配達用のロボカー、ロボトラック等の開発は、いきなりレベル4での商用化を目指して行われているが、既存の大手自動車メーカーによる自家用乗用車の技術開発はステップアップ型であり、レベル2、レベル3を介してのレベル4、さらにはレベル5の自動運転の実現を目指している。

これまではADAS (Advanced Driver Assistance System) は、先進運転支援システムと訳されており、ドライバーの操作を支援する機能として位置づけられており、ADAS が提供する機能はレベル1及びレベル2に相当すると考えられている。しかし、上記国際規格 ISO/SAE PAS 22736 の5.2 運転支援の注記3 (Note 3) によれば、ADAS という用語は広範な内容を含むので技術的定義付けを行うのは適当でないとして、ADAS という用語については定義がなされていない。したがって、ADAS レベル4、ADAS レベル5といった表現が出現しても不思議ではない^{16,17)}。ここでは、Yole Development 社及び Woodside Capital Partners 社ら¹⁷⁾の用語の使用例にならって、ロボタクシーなどの商用車と区別するために、自家用乗用車については、ADAS 車と呼ぶことにする。従って、レベル4以上の自動運転車には、レベル4以上の商用車及びADAS 車が含まれることになるが、レベル4以上のセンサーの価格の低下傾向が緩慢なので、レベル4以上の商用車は少量ながらもすでに出荷されているものの、レベル4以上のADAS 車が量産されて浸透率が2%を超える時期は、かなり後になるものと予測される。

残念なことに、2018年に、米国・アリゾナ州において、タクシー会社所有の自動運転車が走行中、走行試験従事者の不注意により、死傷事故が発生したこと¹⁸⁾や、2020年には、コロナ禍の拡大を防止するために、多数の企業が自動運転車の走行試験を中断したことなどにより、レベル5の完全自動運転を目指した動きは頓挫し、特定条件を満たした場合のみに適用可能なレベル4に限定した開発にAV (Autonomous Vehicle) 業界がシフトしたため、レベル5の完全自動運転車の普及は、概ね2035年以降とかなり先になるものと考えられている¹³⁾。

¹⁶⁾Anonymous: Mobility experience (MX) concepts, <https://tech.toyota-boshoku.com/global/innovation-design/mx-concepts.html> (Accessed 2022.6.7)

¹⁷⁾Anonymous: The automotive LiDAR market, April 2018, Yole Development and Woodside Capital Partners, https://d19j0qt0x55bap.cloudfront.net/production/onboardings/5e5421415aaa397b552399b4/documents/file/Yole_WCP-LiDAR-Report_April-2018-FINAL.pdf (Accessed 2022.6.7)

¹⁸⁾Anonymous: Uber's self-driving operator charged over fatal crash, Sep. 16, 2020, <https://www.bbc.com/news/technology-54175359> (Accessed 2022.6.7)

コロナ禍が広がる以前の2019年1月に出版された自動運転の将来予測に関する報告書¹⁴⁾によれば、自動運転車の販売台数の伸びは、2030年以前は緩慢であり、2030年以降のいずれかの年において立ち上がりのキックが生じ、それ以降は販売台数が急速に伸び、2040年には33百万台に達するとのこと。2020年に拡大したコロナ禍による影響を考慮に入れると、自動運転車の普及時期は上記の予測よりもさらに若干遅れる可能性がある。しかし、後述するように、高速道路上で混雑時の低速走行用など限定した条件下でのレベル3の自動運転が2020年から2022年にかけて、日本、ドイツ、中国などで合法化されたため、主にレベル3のADAS車向けに、ライダー搭載の動きが、欧州、日本、中国等で2021年以降にわかに活発化している。このため、2022年は、ADAS車向け車載ライダーの量産元年とみなせる状況になりつつある。

2.2 車載ライダーの市場予測

2.2.1 用途別ライダーの市場動向

2022年5月にオンラインで開催されたEPIC Online Meeting on LiDAR Miniaturizationと題した会合におけるYole Development社によるライダー市場の展望に関するプレゼン資料¹⁹⁾によれば、2019年から2026年までのライダー市場について、用途別(ADAS, Robotic Cars, Logistics, Smart infrastructure, Manufacturing, Wind, Topography)に、それぞれ売上高及び台数の年次推移のデータが紹介されている。これによれば、2021年から2026年にかけての用途別売上高のCAGR(年平均成長率)は、それぞれ、94%、32%、19%、38%、4%、2%、6%であり、ライダーの全用途の総売上高のCAGRは23%である。2021年における総売上高は、20.02億ドルであり、用途別の売上高(単位百万ドル)は、それぞれ85, 146, 195, 78, 307, 45, 1,146である。これに対して、2025年における総売上高は、43.59億ドルであり、用途別の売上高(単位百万ドル)は、それぞれ1,387, 470, 403, 252, 352, 48, 1,447である。また、2026年における総売上高は、57.18億ドルであり、用途別の売上高(単位百万ドル)は、それぞれ2,318, 575, 466, 466, 395, 379, 49, 1,534である。2021年におけるTopography(地形等の測量)用のシェアは57.2%と高く、トップシェアであるが、2026年には、ADAS車用がシェア40.5%となり、トップシェアとなっている。

また、上記プレゼン資料によれば、2021年から2026年にかけての用途別出荷台数のCAGRは、それぞれ108%、52%、37%、32%、10%、5%、9%である。2021年における総出荷台数は3.7億台であり、用途別出荷台数(単位千台)は、それぞれ143, 27, 55, 60, 67, 0.372, 18である。これに対して、2025年における総出荷台数は37.68億台であり、用途別出荷台数(単位千台)は、それぞれ3,110, 150, 225, 157, 99, 0.452, 26である。また、2026年における総出荷台数は64.57億台であり、用途別出荷台数(単位千台)は、それぞれ5,599, 216, 266, 238, 110, 0.475, 29である。ADAS車用は、2020年以前は出荷台数が小さく、出荷台数ベースでのトップシェアはManufacturing(製造)用であったが、ADAS車用はCAGRがきわめて大きいため、2021年には出荷台数のシェアが38.6%となり、トップシェアとなった。2025年及び2026年における出荷台数ベースでのADAS車用のシェアは、それぞれ82.5%、86.7%である。ちなみに、ADAS車用及びRobotic cars用のライダーの単価(単位千ドル)を計算してみたところ、2021年ではそれぞれ0.59, 5.4であった。また、2025年におけるそれら用途別の単価(単位千ドル)は、それぞれ0.446, 3.133である。また、2026年におけるそれら用途別の単価(単位千ドル)は、それぞれ0.414, 2.662である。ADAS車用及びRobotic cars用のライダーは、いずれも低コスト化が進展しているが、ADAS車用に対するRobotic cars用ライダーの相対的価格比は、2021年は約9.2、また2025年及び2026年はそれぞれ7.02, 6.43である。Robotic cars用ライダーのほうがADAS車用ライダーよりも低コスト化が顕著に進むものの、その単価は、2026年においてもADAS車用に比べて依然としてかなり高価であることが分かる。

Yole Development社とWoodside Capital Partners社は、2018年4月に共同で車載ライダー市場に関して報告した¹⁷⁾。そのプレゼン資料には、2016年から2032年までの長期について、ADAS車用及びRobotic cars用について、出荷金額及び出荷台数の年次推移のデータが詳しく紹介されている。これによれば、例えばADAS車用の2021年、2025年及び2026年の出荷金額(単位百万ドル)は、それぞれ176, 1,535, 2,532であるのに対して、Robotic cars用の2021年、2025年及び2026年の出荷金額(単位百万ドル)は、それぞれ

¹⁹⁾A. Debray: LiDAR market overview, EPIC Online Technology Meeting on LiDAR Miniaturization, May 9, 2022, <https://epic-assoc.com/wp-content/uploads/2021/12/Alexis-Debray-Yole-Developpment.pdf> (Accessed 2022.6.8)

1,614, 4,655, 5,075 となっており, Robotic cars 用の出荷台数のほうが ADAS 車用のそれよりもかなり大きな出荷額になると予測されていたことが分かる. このプレゼン資料^{†7}によれば, ADAS 車用の出荷額が Robotic cars 用の出荷額を初めて上回るのは 2029 年である.

前述した Yole development 社の 2022 年 5 月のプレゼン資料^{†9}と 2021 年の出荷金額を比較してみると, ADAS 車用の出荷金額は, 2018 年に予測した出荷金額の約 0.483 倍であるのに対して, Robotic cars 用の出荷金額は, なんと 0.09 倍となっており, これまでに予測されていた市場規模が大幅に縮小してしまったことが分かる. Robotics car 用の出荷金額の予測が大幅に縮小した理由は, 前述したごとく, タクシー会社所有の自動運転車が走行中, 走行試験従事者の不注意により, 死傷事故が発生したこと^{†8}や, 2020 年には, コロナ禍の拡大を防止するために, 多数の企業が自動運転車の走行試験を中断したことなどにより, レベル 5 の完全自動運転を目指した動きが頓挫したことなどによるものと考えられる.

Strategy Analytics 社による車載ライダーに関する 2021 年 9 月 7 日付けのレポート¹⁵⁾には, ラスト 1 マイルの短距離自動運転シャトルや公道以外を走行する荷物運搬車及び重量 6 トン以上の大型車などを除外した比較的軽量な新車向けの公道走行用高分解能ライダーの 2018 年から 2028 年までの世界主要地域別の出荷台数の予測が記載されている. これによれば, 例えば 2021 年, 2025 年, 及び 2026 年の総出荷台数(単位千台)については, それぞれ 188, 3,025, 5,111 となっている. これらの値を, 前述した Yole Development 社による 2022 年 5 月のプレゼン資料^{†9}に記載されていた ADAS 車用の 2021 年, 2025 年, 及び 2026 年の出荷台数(単位千台), それぞれ 143, 3,110, 5,599 と比較してみると, 出荷台数に関する市場予測には, それほど大きな相違がないことが分かる.

上述した Strategy Analytics 社のレポートによれば¹⁵⁾, 地域別の出荷台数のトップは, 2026 年までは欧州であるが, 2027 年以降は中国がトップになると予測されている. ちなみに, 2028 年の総出荷台数は 9,707 千台であるが, 同年の地域別シェアは, 中国 30.0%, 欧州 29.3%, NAFTA(北米 3 ヶ国) 23.8%, 日本 9.76%, 韓国 6.97%, その他 0.06%, がそれぞれ予測されている.

中国におけるライダー関係の情報をインターネットで検索してみると, 中国語で記載されたブログ等では, Frost & Sullivan 社のレポートを出典元としたライダー市場規模に関する記載がかなり多く見られる. しかし同社の英文の原著レポートは高価であるため, 原著に当たって直接確かめることはあきらめざるを得ない. 間接情報になるが, 中国系ライダーメーカーである Neurvision 社のブログ^{†10}によれば, Frost & Sullivan 社は, 2025 年におけるライダーの世界市場規模は 135.4 億ドル, 2019 年から 2025 年までの年平均成長率は 64.5%, このうち 2025 年の中国の市場規模は 43.1 億ドルであると予測している. これらのライダーは, 車載用のほかに, 地形測量用など他の用途も含んでいると考えられ, 前述した Yole Development 社の 2022 年 5 月のプレゼン資料^{†9}に記載されていた 2025 年における全用途向けライダーの総出荷額 43.59 億ドルと比較してみると, Frost & Sullivan 社が予測した同年の市場規模は, Yole development 社が予測した市場規模の 3.11 倍であることが分かる. 新規ビジネスに強気な中国系企業は, 市場規模が大きい Frost & Sullivan 社による予測値のほうを好んでいるのかも知れない.

車載用ライダーに関して多くのブログを寄稿している Patience Consulting 社の Rangwala 氏の調べによれば^{†11}, ADAS 車, AV(自動運転車), 及びトラック向けの TAM(Total Available Market)に関して報告している市場調査レポートによる市場規模の平均値は, 2025 年が約 106 億ドル, 2030 年が約 310 億ドルとのこと. また, 2025 年にはレベル 3 及びレベル 4 の車が 8 百万台, レベル 4 のトラックが 57 千台出荷されると想定されており, ライダーの価格は, 自動車 1 台当たり 1,300 ドルとなること, また 2030 年には, レベル 3 及びレベル 4 の車が 21 百万台, レベル 4 のトラックが 4 百万台出荷され, 自動車 1 台あたりのライダー価格は 1,400 ドルになることなどが述べられている. 2025 年よりも 2030 年のほうが自動車 1 台あたりのライダー価格が高くなる理由は, レベル 3 の車よりも多数のライダーを必要とするレベル 4 の車の比率が高まるためであるとしている.

^{†10}Neuvision, Inc: Insight on LiDAR industry chain, March 18, 2021, <https://www.neuvision.com/media/blog/LiDAR-industry-chain.html> (Accessed 2022.6.8)

^{†11}S. Rangwala: LiDAR: Lighting the path to vehicle autonomy. Automotive LiDAR is a brutal but exciting business, and there will be big winners, just like there were in the fiber optics boom-and-bust period 20 years ago, March 1, 2021, <https://spie.org/news/photonics-focus/marapr-2021/LiDAR-lighting-the-path-to-vehicle-autonomy?SSO=1> (Accessed 2022.6.8)

2.2.2 ライダーのタイプ別市場動向

ライダーのタイプは、機械的走査の有無および走査の動作原理などによって、(レーザー光源 360° 旋回型の) 機械式、(レーザー光源は固定だが、回転鏡等でビームの出射方向を機械的に走査する) 半固体型、及び機械的駆動機構を全く含まない全固体型の3タイプに大きく分類できる。ビームの走査に MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) を用いる MEMS 走査型ライダーは、MEMS の駆動部が極めて微小であることから、全固体型ライダーの範疇に含めるという考え方と、微小とはいっても MEMS には駆動部が存在するので、半固定型ライダーに含めるという二通りの考え方があるので、MEMS 走査型ライダーの位置づけには注意が必要である。全固体型ライダーには、ビーム走査部を全く含まないフラッシュライダーと、OPA (Optical Phased Array) などの光学的な手段によりメカレスにビームを走査するメカレス光学走査方式固体ライダーとがある。メカレス光学的走査手段には、後述するように OPA のほかにも複数の走査手段があるが、とりあえず市場動向に関する議論においては、メカレス光学的走査手段の詳細な区別は問わずに、それらを一括して OPA の範疇とみなすことにする。

前述した Yole Development 社と Woodside Capital Partners 社とが、2018 年 4 月に共同で車載ライダー市場に関して報告したプレゼン資料¹⁷⁾には、半固体型ライダーを含んだ全機械式ライダーと全固体型ライダーとに分けて、2016 年から 2032 年にかけての、ADAS 車用及び Robotic car 用のライダーの出荷額及び出荷台数について、年次推移を予測している。このプレゼン資料においては¹⁷⁾、MEMS 走査型ライダーは、全固体型ライダーの範疇に含めている。これによれば、Robotic car 用については、例えば、2025 年における全機械式ライダー及び全固体型ライダー (メカレス光学的走査機能を有した固体型ライダー及びフラッシュライダー) の売上高 (単位百万ドル) は、それぞれ 4,582, 73 であり、全固体型ライダーのシェアは 1.6% 未満である。2032 年については、それぞれ 6,719, 1,492 であり、全固体型ライダーのシェアは 18.2% 程度まで高まると予測されている。一方、ADAS 車用については、例えば、2025 年における全機械式ライダー及び全固体型ライダー売上高 (単位百万ドル) は、それぞれ 1,312, 223 であり、全固体型ライダーのシェアは約 15% である。この値は、同年における Robotic car 用全固体型ライダーのシェアに比べて、10 倍弱大きい。また、2032 年については、ADAS 車用の全機械式ライダー及び全固体型ライダー売上高 (単位百万ドル) は、それぞれ 2,068, 7,550 であり、全固体型ライダーのシェアは約 78.5% にまで高まるものと予測されている。

ABI Research 社は、交通や人流等を監視するスマートシティ用や、防犯などのセキュリティ用、工場内等での物品搬送監視などの産業用などに使用されるライダーを IoT ライダーと位置づけ、IoT ライダー及び車載ライダーの設置ないし搭載数の 2020 年から 2030 年にかけての年次推移を予測している¹⁶⁾。これによれば、車載ライダーのほうが出荷台数ベースでの成長率が高いものの、2020 年から 2030 年まで、常に IoT ライダーのほうが出荷台数ベースで上回っており、2030 年では、車載ライダーは 12.95 百万台なのに対して、IoT ライダーは 15.98 百万台になると予測している。

また同社は、車載ライダーについては、機械式ライダー、MEMS 走査型及びフラッシュ型ライダー、及びメカレスの光学的走査方式固体型ライダーに分けて、それらの 2020 年から 2030 年にかけての搭載台数の年次推移を予測している。Fig. 1 に、それら車載ライダーの年次推移を示す¹⁶⁾。Fig. 1 における機械式 (Mechanical) ライダーには、全ての半固体型ライダーが含まれている。同社は、理想的な究極の車載ライダーはメカレス光学的走査方式の固体型 (Solid State) ライダーであり、微小なサイズであっても機械的な駆動部を含んだ MEMS 走査型ライダーや、遠距離までの測定に不向きなフラッシュライダーは、機械式ライダーとメカレス光学的走査方式固体型ライダーとの中間に位置する暫定的なライダーであると考えている。非機械式ライダー (MEMS 走査型を含む) のシェアが機械式ライダーのシェアを初めて超える時期、は 2025 年から 2026 年にかけての間が想定されている。メカレス光学的走査方式固体型ライダー (主として FMCW 方式ライダー) は、市場での立ち上がり時期が 2026 年頃と考えられており、2026 年以降の年平均成長率はかなり高いものの、そのシェアは 2030 年になっても MEMS 走査型ライダー及びフラッシュライダーとからなる中間的位置づけのライダーには及ばないと考えられている。なお、メカレス光学的走査方式固体型ライダーが搭載台数ベースで機械式ライダーにほぼ追いつくのは 2029 年頃と考えられている。

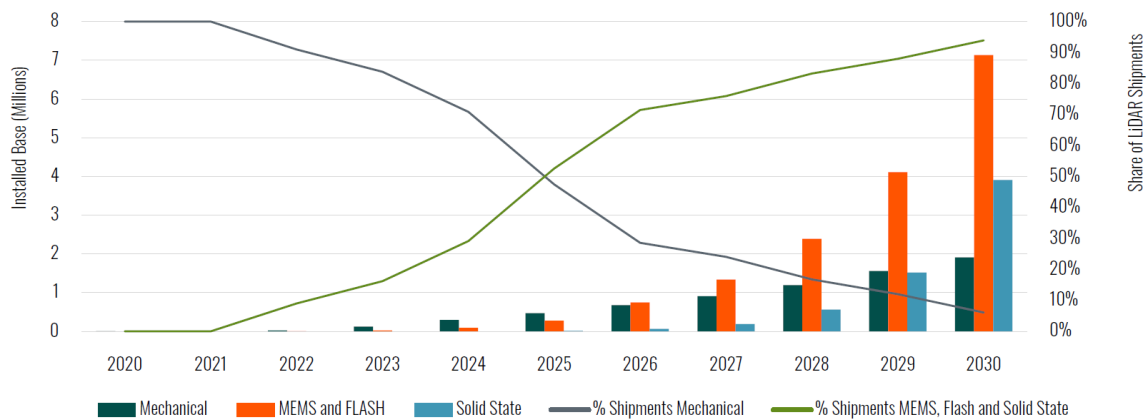


Fig. 1 Installed base of automotive LiDAR sensors world markets from 2020 to 2030¹⁶⁾
(© ABI Research).

3. 車載ライダーの現状

3.1 市販乗用車へのライダー搭載状況

Table 1 に、ライダーを搭載した自家用乗用車（物流用トラックやロボタクシー等の商用車は除く）のいくつかの事例についての、搭載したライダーの種類及び搭載個数に関する一覧を示す。最近ではライダーを搭載した車種が急増しているため、それらすべてを網羅したものではないこと、及び搭載されたライダーの概要について、自動車メーカーが詳しく公開することはあまりないので、種々の伝聞を含んだインターネット情報を検索した結果をとりまとめたものであるため、記載内容に一部推測が含まれており、かならずしも記載内容の全部が正しいかどうかは分からないということをお断りしておく。

Table 1 には、自動車メーカー 20 社の事例が記載されている。自動車メーカー数の国別内訳は、中国 11 社、ドイツ 3 社、米国 3 社、日本 2 社、スウェーデン 1 社であり、中国の自動車メーカー数が圧倒的に多い。また、ライダーを搭載した車種は、圧倒的に電気自動車（EV）が多いようである。Table 1 に記載されたライダーの種類をみると、360° 旋回型の機械式ライダー及びメカレス光学的走査方式全固体型ライダーが ADAS 車用に採用された事例は見当たらない。これまでのところ、ADAS 車用に採用されたライダーは、いずれも半固体型ライダーないし（全固体型ライダーのうちの）フラッシュライダーのみである。

2017 年に Audi が世界に先駆けて、Valeo 社製ライダー Scala 1 を搭載したレベル 3 の機能を有する ADAS 車 A8 を発売したが、コストの問題等があり、その後しばらくライダーを搭載した ADAS 車が現れなかった^{†12)}。

しかし、2021 年以降は、レベル 2 を高度化したレベル 2+ や、より高度なレベル 3 の機能を有した ADAS 車が續々と生産されるようになった。ADAS 車には多くのセンサー（カメラ、レーダー、超音波センサーなど）が搭載されているが、Tesla 社以外の多くの自動車メーカーは、高信頼度なレベル 3 以上の機能の実現には、ライダーの搭載はほぼ必須と考えていると思われる。Yole Development 社のレポート¹⁷⁾によれば、2021 年第 3 四半期時点で、自動車向けのライダー開発に携わっている企業数は 60 社以上あるが、このうち既に自動車完成車メーカー（OEM: Original Equipment Manufacturer）に採用されたライダー社数は 14 社あるとのこと。車載用として採択された（Design win）件数は 29 件あるが、その件数ベースの比率で 1 位が Valeo 社（28%）、2 位が Robosense 社（10%）、3 位が Luminar 社、Livox 社、Denso 社、Continental 社、Cepton 社（各 7%）などである。

3.2 各種車載ライダーの動作方式及び主な仕様

Table 2 に、これまでに市販の乗用車に搭載されたか搭載が決まったと報道された車載用ライダーの種類

^{†12)}J. Yoshida and M. D. P. Emilio: Audi A8 with Level 3 self-drive and LiDAR technology, May 21, 2020, <https://www.eeweb.com/audi-a8-with-level-3-self-drive-and-lidar-technology/> (Accessed 2022.6.13)

Table 1 Examples of ADAS passenger cars equipped with LiDARs

Probable start year of production	Car manufacturer	Brand, Model	LiDAR manufacturer	LiDAR model	Presumptive, LiDAR type and features	Number of LiDARs per car
2017	Audi (Germany)	A8	Valeo	Scala 1	Mirror scanning (4 layers)	1
2021	Mercedes Benz (Germany)	S class	Valeo	Scala 2	Mirror scanning (16 layers)	1
2021	Honda (Japan)	Legend	Valeo	Scala 1	Mirror scanning (4 layers)	5
2021	Toyota (Japan)	Lexus LS	Denso	(Front Lidar)	Mirror scanning (Range 200 m)	1
			Continental	(HFL110 ?)	3D flash lidar (Range 20 m)	3
2021	Lucid (USA)	Air	Robosense	M1	MEMS scanning (Range 150m)	1
2021	Xpeng (China)	P5	Livox	HAP	Non-repetitive mechanical scanning	2
2022	NIO (China)	ET7 and ET5	Innovusion	Falcon	Mirror scanning (λ : 1550 nm)	1
2022	BMW (Germany)	iX	Innoviz-Magna	Innovizone	MEMS scanning (Range 150 m)	1
2022	SAIC (China)	R Auto ES33	Luminar	Iris	Mirror scanning (λ : 1550 nm)	1
2022	BAIC (China)	ARCFOX Alpha S Huawei HI Version	Huawei	(96 beam)	Mirror scanning (Range 150 m)	3
2022	GAC (China)	Aion LX Plus	Robosense	RS-LiDAR-M1	MEMS scanning (Range 150m)	3
2022	WM Motor (China)	M7	Robosense	RS-LiDAR-M1	MEMS scanning (Range 150m)	3
2022	Xpeng (China)	G9	Robosense	RS-LiDAR-M1	MEMS scanning (Range 150m)	2
2022	Changan Automobile (China)	AVITA 11	Huawei	(96 beam)	Mirror scanning (Range 150 m)	3
2022	Volvo (Sweden)	Embla	Luminar	Iris	Mirror scanning (λ : 1550 nm)	1
2022 ?	Great Wall Motor (China)	Wey Mocha	ibeo-ZF	ibeoNET	2D VCSEL arrays (Sequential flash)	3 (Long range 1, Medium 2)
2022	Li Auto (China)	L9	Hesai	AT 128	Hybrid solid-state (128 VCSEL arrays)	1
2022	Faraday Future (USA)	FF91	Velodyne	H800	"MEMS-like" solid-state lidar	2
2023	General Motors (USA)	Nine different models	Cepton-Koito	(Vista X90, to be modified)	Micro-motion technology (MMT)	Unknown
2023	Geely Automotive (China)	Lotus Eletre	Hesai	AT 128	Hybrid solid-state (128 VCSEL arrays)	2
			Robosense	RS-LiDAR-M1	MEMS scanning (Range 150m)	2

Table 2 Presumed operating principles and representative specifications of 3D LiDARs adopted for ADAS cars

LiDAR Provider & Model	Presumed scanning methodology	Layers (channels) in equivalent or 2D-pixel layout	FOV (H x V) (degree)	Angular resolution (degree)	Range (m) for 10% reflection	Frame rate (fps)	Wavelength (nm)
Valeo SCALA 2	Rotating-mirror-based 1D mechanical scanning	16 per scan 16+16 interlaced per scan pair	130° x 10°	Horizontal: 0.125° for ±15° (inner) 0.25° for outer lobes Vertical: 0.6°	100 @50% True positive rate	25	905
Livox HAP	(Risley-prism-based) non-repetitive scanning	Equivalent to 144 lines	120° x 25°	up to 0.16° x 0.2°	150	20	(905 ?)
Cepton Vista X90	Micro-motion technology (MMT)	Unspecified	90° x 25°	up to 0.13° x 0.13°	up to 200	up to 40	905
Luminar Iris	Precision 2 axis scanner using low-mass motor scanned mirrors	640 lines/s Software configurable	H: 120° V: 0~26°	Horizontal: Min. 0.05° Vertical: Min. 0.05°	250	1~30	1,550
Innovusion Falcon	2D-mirror scanning (using a rotating polygon mirror and a 1D scanning mirror ?)	1500 lines/s Software configurable	120° x 25° ROI size: 40° x 4.8°	Within ROI † region: Min: 0.05° x 0.05° Outside region: 0.18° x 0.24°	250	10	1,550
Innoviz Innovizone	2D-MEMS scanning	Unspecified (Equivalent to 250 lines?)	115° x 25°	0.1° x 0.1°	(~250) (Dependent on within ROI † or not, etc.)	Uniform FOV 10 fps FOV with ROI † 15 fps	905
Robosense RS-LiDAR-M1	2D-MEMS scanning	Unspecified (Equivalent to 125 lines?)	120° x 25°	0.2° x 0.2° (Average)	120	10	905
Huawei (96 beam)	Combination of 1D-mirror scanning and micro- MEMS 2D-scanning ?	96 beams	120° x 25°	0.25° x 0.26°	150	Undisclosed	Undisclosed (9xx nm?)
Hesai AT128	Rotating-mirror-based 1D mechanical scanning with 128 VCSEL 1D array	128 (Overall resolution: 1200 x 128)	120° x 25.4°	0.1° x 0.2°	200	Frame rate ? (1.53 million points/s)	905
Velodyne H800	MLA (Micro-Lidar Array architecture) (Details are undisclosed)	Undisclosed (8 channel 905 nm edge emitting lasers are used)	120° x 16° ? (Specifications are preliminary)	0.1° ~0.25° ? Undisclosed (Specifications are preliminary)	170 ? (Specifications are preliminary)	Undisclosed (Specifications are preliminary)	905
Ibeo IbeoNext	Flash Using 128 x 80 VCSEL 2D array (All-solid-state)	Pure-electric sequential row scan 120 channel in parallel	Long range: 11.2° x 5.6° (7°) * Short range: 60° x 30° (37.5°) * * non-uniform resolution	Long range: 0.09° (0.04°) ** x 0.07° Short range: 0.47° (0.23°) ** x 0.38° ** interlaced	Long range: 150 (Short range: 40)	Typical 25 (Fully programmable)	885
Continental HFL110	Flash (All-solid-state)	128 x 32 (4096) pixels	120° x 30°	Unspecified (0.94° x 1.07° ?)	< 50 ? (Reflectivity not specified)	25	1,064

† ROI: Region of Interest

並びにそれらの走査方式及び仕様の概要を示す。ライダーの具体的な装置構成や走査方式の詳細などはライダーメーカーのカatalogに記載されていないことがしばしばあり、また、メーカーの仕様もバージョンアップ等でしばしば変更されるため、インターネットによる情報検索や特許検索などによる情報を加味して、とりあえず筆者が表にとりまとめたものであるが、記載内容の全てが、現時点において、実際に正しいのかど

^{†13}Anonymous : レーザーレーダー (LiDAR) Iris, https://www.cornestech.co.jp/tech/products/products_luminar_lidar_iris/ (Accessed 2022.6.13)

^{†14}Neuvision, Inc.: Luminar's LiDAR is tested by Tesla?, June 3, 2021, <https://www.neuvision.com/media/blog/tesla-testing-luminars-lidar.html> (Accessed 2022.6.13)

うかは分からないということをお断りしておく。例えば、Luminar 社製ライダー Iris の製品が紹介されているホームページ上では「水平視野角 120°, 垂直視野角 26° の 2 次元スキャンミラーを使用」という記載がある^{†13} が、同社からの出願特許の題目を調べてみると、題目中にポリゴンという用語が含まれている特許が数件あったので、少なくとも 1 軸のビーム走査は、ポリゴン回転が利用されている可能性がある^{†18}。一方、インターネット検索によれば、走査に MEMS ミラーが用いられているという書き込みもある^{†14}。しかし、同社の英文のホームページ上に、性能とコストのバランスから考えて、(複数の) 低質量の走査ミラーを用いた 2 軸の機械式の走査が最適であると記載されているので、すくなくとも MEMS 走査は採用されていないことは確かであろう^{†15}。なお、Huawei 社の 96 ビームのライダー (内製用なので、製品名は不明) については、単なる機械的回転ミラーが用いられているという書き込みがある一方で^{†16}、同社製ライダーに関するインターネット上の中国系の評論では、同社製車載ライダーは年産 10 万台以上、価格は量産時 200 ドル以下を目指しているという記載とともに、低価格化実現のために、同社が出願した MEMS2 次元走査方式のライダー^{†19}が同社製の車載ライダーにすでに採用されているに違いないと述べている書き込みも見られる^{†17}。このため、同社製車載ライダーには、現在既に 2 次元走査用に MEMS ミラーが用いられている可能性が高そうに思われるが、実機を入手してのティアダウンによる確認は容易でない。

前述した Yole Development 社のレポート^{†17}によれば、車載用として採択された Design win 29 件の走査方式別シェアは、機械式 66%, MEMS 走査方式 17%, フラッシュ方式 10%, 不明 7% である。Table 2 に記載した 12 社のライダーについて、走査方式別シェアをみると、機械式 50%, MEMS 方式 33%, フラッシュ方式 17% となった。なお、ここでは、Huawei 社の 96 ビームのライダーは、MEMS 走査方式であろうとみなした。また、Velodyne 社のライダー H800 は、同社からは走査方式が開示されていないものの、MEMS 類似の走査方式が採用されていると考えられるという記載のブログ^{†18}が見つかったので、ここではこの同社のライダーは MEMS の範疇に含めて走査タイプ別のシェアを計算した。

また、上記 Yole Development 社のレポート^{†17}によれば、車載用として採択された Design win 29 件についての波長別シェアに関しては、905 nm が 69%, 1,550 nm が 14%, 1,064 nm が 7%, 885 nm が 3%, 不明が 7% としている。Table 2 に記載した 12 社のライダーについて、波長別のシェアを計算してみると、905 nm 58%, 1,550 nm 17%, 1,064 nm 8%, 885 nm 8%, 不明 8% となった。ここで、Livox 社のライダー HAP の波長はおそらく 905 nm であろうとした。また、Huawei 社の 98 ビームのライダーについては、使用波長に関する情報が全く見つからなかったもので、使用波長は不明とした。

4. 車載用次世代全固体ライダーの開発状況

4.1 次世代全固体ライダーの種類

ここでいう次世代全固体ライダーは、機械的なビーム走査手段を用いない全固体ライダーであって、かつスキャン機能を全く有しないフラッシュライダーを除外したものである。遠距離用ライダーには、背景光の影響が大きく、かつ高ピーク出力が必要となる全面一括フラッシュ方式のライダーは適さないもので、何らかの走査機構を含んだライダーのほうが次世代全固体ライダーにふさわしいと思われる。次世代全固体ライダーには、1 次元ないし 2 次元の電子的スキャン機能を有した VCSEL アレイ^{†20}を用いたデジタル (フラッシュ) ライダー並びに位相変調機能を有した光学的位相変調アレイ (OPA: Optical Phased Array)^{†21,†22}及びレンズ焦点面に配置した、フォーカルプレーンスイッチアレイ (FPSA: Focal Plane Switch Array)^{†23}が含まれ

^{†15}M. Weed: Sensor(y) overload: Making sense of lidar, <https://www.luminartech.com/sensory-overload-making-sense-of-lidar/> (Accessed 2022.6.13)

^{†16}S. Chen: Huawei LiDAR preview, Dec. 10, 2020, <https://schen583.medium.com/huawei-lidar-preview-922dd2d72828> (Accessed 2022.6.13)

^{†17}Anonymous: J. Huawei takes action: Releases high-performance automotive-grade lidar with an annual output of 100,000 sets (in Chinese), Dec. 26, 2020, <https://www.vzkoo.com/read/16c5debbd2694b24d41d1823700b926a.html> (Accessed 2022.6.13)

^{†18}S. Abuelsamid: Velodyne's \$500 Velarray Solid-State Lidar Goes Into Production In 2021 Nov. 13, 2020, <https://www.forbes.com/sites/samabuelsamid/2020/11/13/velodyne-announces-500-velarray-h800-lidar-production-in-2021/?sh=24197b146e8f> (Accessed 2022.6.17)

る。FPSAを用いたビーム走査法は、LABS (Lens-Assisted Beam Steering) 法とも呼ばれている²⁴⁾。メタ表面 (Metasurface) を用いたビーム走査手段もいろいろ研究開発されており²⁵⁾、それらも広義的にはOPAの範疇に含めるべきかも知れないが、Lumotive社が開発した液晶メタ表面 LCM (Liquid Crystal Metasurface) による走査方式¹⁹⁾は、他のOPAによる走査方式と比べて、量産性がよく、かつ大口径化も比較的容易であることなど、優れた特性を種々備えているように思われるので、Spector氏によるライダー用走査方式の分類²⁴⁾にならって、LCMについては、他のOPAと区別して以下に解説する。

4.2 デジタル (フラッシュ) ライダー

Ouster社は、波長850 nmのVCSELアレイ及びSPADsアレイを用いたマルチビームフラッシュライダーOS-1などをすでに市販していたが、それらの水平走査には360°旋回型機械式走査が用いられていた²⁰⁾。同社の2022年5月に発表された投資家向けプレゼン資料²¹⁾によれば、同社は、機械的駆動部を全く含まない全固体型デジタルライダーDFシリーズを現在開発中である。A-サンプルは2022年中に出荷されるが、量産は、B-サンプル、及びC-サンプルの出荷及び評価を終えた後の2025年になる予定とのこと。遠距離用及び中距離用各1台、並びに短距離用3台の合計5台のセットで、多くのADAS機能が満たすことができ、平均価格は1台あたり約200ドル、1セットで約1,000ドルが予定されている。なお、DFシリーズで使用するVCSELの波長がOS-1と同様に波長850 nmなのか、それとも波長905 nmなど別の波長が使用されるのかどうかを含めて、DFシリーズの仕様の詳細は不明であるが、ライダーのデータ取得速度として13 Mポイント/sが予定されている²¹⁾ので、かなり高精細な3次元像のデータが得られる全固体ライダーが2025年頃に入手可能になるものと推察される。

4.3 LCM 走査型ライダー

Lumotive社は、ToFライダーとして動作する、LCM走査型ライダーをメタライダー (Meta-LidarTM) と呼び、その第一弾として、測定距離10~20 mを対象とした、CMOS技術とVCSEL技術を活用したLumotive M30の製品発表を行った²²⁾。これによれば、このM30のFOV (Field of View) は、120°×90°であり、分解能は640×480である。同社は、その後まもなくして、スマートフォンや拡張現実AR (Augmented Reality) 用の短距離ライダーU30 (測定距離10 m, 消費電力0.5 W) 及び車載長距離用L30 (測定距離200 m) を製品系列に加えて、LCM走査型ライダーをシリーズ化した²³⁾。L30の主な仕様は、小型 (<400 cm³)、広視野 (140°×90°)、高分解能 (0.1°×0.1°)、高フレーム速度 (>20 Hz)、などである。同社のLCM走査型ライダーは、送信用及び受信に、動的かつホログラフィックに反射パターンが変えられるLCMが、それぞれ各1個、計2個用いられている²⁶⁾、¹⁹⁾。同社のLCMは、0.13 μmの微細なCMOS半導体プロセスを用いて製造されており¹⁹⁾、量産時にはコスト低減に大きな効果を発揮するものと推察される。

同社のLCM走査型ライダーにおいては、おそらくLCMによる走査は1次元方向のみであり、これと直交する方向については、線状のビーム光源を用いる一方向フラッシュ方式か、あるいは1次元のVCSELアレイを用いた1次元電子的走査方式との併用方式が用いられているのではないかと推定される²⁶⁾。なお同社の最近の特許には、ライダーの薄型化及び堅牢化などの目的で、光源部及び受光部からLCMまでのビームデリバリー用として、光導波路を用いるようにしたものや²⁷⁾、LCMのスイッチング動作時間は25 μs程

¹⁹⁾G. M. Akselrod: Optics for automotive lidar: Metasurface beam steering enables solid-state, high-performance lidar, <https://www.laserfocusworld.com/print/content/14036818> (Accessed 2022.6.15).

²⁰⁾A. Pacala: マルチビームフラッシュライダーのしくみ, Nov. 8, 2018, <chrome-extension://efaidnbmnnpbpcjpcglclefindmkaj/https://www.opt-techno.com/opt-ouster/pdf/how-multi-beam-flash-lidar-works.pdf> (Accessed 2022.6.15)

²¹⁾Ouster: Ouster Investor Presentation, May 2022, [https://s27.q4cdn.com/377532724/files/doc_presentation/2022/06/May-2022-Investor-Presentation-\(3\)_re.pdf](https://s27.q4cdn.com/377532724/files/doc_presentation/2022/06/May-2022-Investor-Presentation-(3)_re.pdf) (Accessed 2022.6.15)

²²⁾Lumotive: Lumotive unveils Meta-LidarTM platform—Industry's smallest, solid-state, all silicon, scalable 3D sensing solution, Sept. 6, 2021, <https://lumotive.reportablenews.com/pr/lumotive-unveils-meta-lidar-platform-industry-s-smallest-solid-state-all-silicon-scalable-3d-sensing-solution> (Accessed 2022.6.15)

²³⁾Lumotive: Products (Lumotive M30, Lumotive U30 and Lumotive L30), <https://www.lumotive.com/products>, (Accessed 2022.6.15)

度と高速^{†19}なので、ビームの走査はステップ状に行ない、LCMの走査が短時間停止している間にレーザービームを送受信して、LCMの走査方向とは直交する方向における測距データを安定に取得するようにした走査方式²⁸⁾や、LCM及び送受信光学系による湾曲歪みをあらかじめ補正する機能を備えたLCM駆動によりビームを走査する方式²⁸⁾など、興味深い内容がいくつか含まれている。

4.3 OPA走査型ライダー

OPA走査型ライダーで市販品がある著名なメーカーは、現在のところQuanergy社のみである。当初遠距離まで使用可能な車載用ライダーが早期に実現されるものと期待されていたが、いまだに車載用ライダーの市販品は実現していない。現在ホームページ上で紹介されている、波長905 nmを用いた、OPA走査方式全固体型ライダーS3-2NSI-S00の測定距離は、反射率10%の被写体の場合、最大7 m、視野角 $50^{\circ} \times 4^{\circ}$ であり、測定距離が短く、かつ視野角が狭い²⁹⁾。同社は、2022年5月に、OPA走査型ライダーS3シリーズのテストにおいて、最大測定距離250 mが実現したと発表した^{†24}が、視野角や分解能など、測定距離以外のデータに関しては開示情報がなく、これだけではあとの程度の開発期間が過ぎれば実用的な車載ライダーが実現するのか全く不透明である。同社が開発中の車載用OPA走査型ライダーは、FMCW方式ではなくToF方式であろうと思われる。しかし、どのようなタイプのOPAが用いられているのかは開示されておらず、同社のOPAの詳細は不明である。

128本の平面光導波路の1次元アレイを用いたOPAでは、1,350 nm～1,630 nmの広帯域な波長可変レーザーとの組合せにより、 $140^{\circ} \times 19.23^{\circ}$ のFOVを有する2次元走査が実現している³⁰⁾。走査ビームの広がり角は、 $0.021^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ である。これを用いて、反射率90%の高反射率の被写体に対して、FMCW方式にて、最長100 mまでの距離測定が行われた³⁰⁾。平面光導波路タイプの1次元アレイを用いたOPAでは、導波路間の位相シフトの制御によるビーム走査は1次元の走査であるため、2次元の走査を実現するには、広帯域の波長掃引など別の手段が必要であり、波長1,550 nmを含むSWIR域ではシリコンフォトリソグラフィを活用したコンパクトで安価な広帯域波長可変レーザー光源が実現する可能性が高いが、波長905 nmを含むNIR域用の広帯域波長可変レーザー光源の開発はかなり難しいものと思われる。平面導波路の2次元アレイを用いたOPAでは、これまでに最大 $6.4^{\circ} \times 4.4^{\circ}$ 程度の2次元走査した実現しておらず、2次元アレイを用いた平面導波路型OPAは実用的でないと考えられる²³⁾。また、光導波路には、光損傷が生じる懸念があるため、高出力なレーザー光を扱うことがむずかしく、FMCWよりも高ピークパワーが必要となるToF方式のライダーへの平面導波路型OPAの適用は現実的でないと思われる。

4.4 FPSA²³⁾(LABS²⁴⁾)走査型ライダー

FPSA²³⁾(別称LABS²⁴⁾)は、OPAよりもコンパクトであり、かつ光導波路等への要求仕様が緩やかで製造しやすいので、FMCW方式の全固体型ライダー用の2次元走査には、OPAよりも適しているものと考えられている。

FPSA用のスイッチング素子には、マッハツェンダー干渉計MZI(Mach-Zehnder Interferometer)及びMEMSなどが用いられている^{23, 24)}。Pointcloud社は、MZM(Mach-Zehnder Modulator)を用いて、512(32×16)ピクセルを有した大規模なコヒーレント検波アレイを開発し、平均出力4 mWのレーザーを用いて、FMCW方式により距離75 mまでの3次元イメージング実験を行った³¹⁾。将来は、デジタルカメラ同様の、20メガピクセル級の高精細なライダー画像が実現できる可能性があるとのこと。

これまでのところ、スイッチング素子としてMZIを用いたものよりも、MEMSを用いたほうが高精細の2次元センサーが実現している²³⁾。MEMSアレイをスイッチング素子に用いた 128×128 (16,384)ピクセルのFPSA型ライダーでは、FOVが $70^{\circ} \times 70^{\circ}$ で、アドレッシング分解能(Addressing Resolution) $0.6^{\circ} \times 0.6^{\circ}$ が得られている。ランダムアクセスによるイメージングが可能であり、アドレッシングの応答速度はサブMHzと高速である。レーザー出力2 mWを用いて、FMCW方式による距離10 mまでの3次元ライダー実験が行

^{†24}Quanergy: Quanergy delivers industry-first 250 meter range for OPA-based solid state LiDAR, May 10, 2022, https://quanergy.com/wp-content/uploads/2019/12/S3-2-Solid-State-LiDAR-for-Industrial-Applications_QPN-96-00087.pdf (Accessed 2022.6.15)

われた²³⁾。

FMCW方式の車載ライダーを開発している企業は、Aeva社、Mobileye社、Aurora社、GM社傘下のStrobe社など多数あるが、それらの企業がどのようなタイプのビーム走査方式を採用しているのかとか、それらの企業におけるスキャナーの開発の現状に関する公開情報が見当たらない。コンパクトなFMCW方式全固体型ライダー用の走査方式には、平面導波路を用いたOPAよりもFPSAが有望であろうと思われるが、FPSAの量産等による安価でかつ高性能な車載用FMCWライダーが実現するのは、まだかなり先であり、恐らく2025年以前での量産の実現は難しいのではないと思われる。

引用文献

- 1) C. Rablau, "LiDAR—A new (self-driving) vehicle for introducing optics to broader engineering and non-engineering audiences," *Proc. SPIE*, **11143**, 111430C, 1–14 (2019).
- 2) R. Halterman and M. Bruch, "Velodyne HDL-64E LiDAR for unmanned surface vehicle obstacle detection," *Proc. SPIE*, **7692**, 76920D, 1–8 (2010).
- 3) R. Shanker, A. Jonas, S. Devitt, K. Huberty, S. Flannery, W. Greene, B. Swinburne, G. Locraft, A. Wood, K. Weiss, et al., "Autonomous Cars. Self-Driving the New Auto Industry Paradigm," *Morgan Stanley Blue Paper*, 1–109 (2013).
- 4) E. Ackerman, "LiDAR that will make self-driving cars affordable," *IEEE Spectrum*, News, 14 (2015).
- 5) F. Zhao, H. Jiang, and Z. Liu, "Recent development of automotive LiDAR technology, industry and trends," *Proc. SPIE*, **11179**, 111794A, 1–8 (2019).
- 6) R. Roriz, J. Cabral, and T. Gomes, "Automotive LiDAR technology, A survey," *IEEE Trans. Intell. Transp. Sys.* 1–16 (Early access, Date of Publication: 15 June 2021) DOI: 10.1109/TITS.2021.3086804.
- 7) S. Royo and M. Ballesta-Garcia, "An overview of LiDAR imaging systems for autonomous vehicle," *Appl. Sci.* **9**, (4093) 1–37 (2019).
- 8) Y. Li and J. Ibanez-Guzman, "LiDAR for autonomous driving: The principles, challenges, and trends for automotive LiDAR and perception systems," *IEEE Signal Processing Magazine*, **37** (4), 50–61 (2020).
- 9) T. Yang, Y. Li, C. Zhao, D. Yao, C. Chen, L. Sun, T. Krajnik, and Z. Yan, "3D ToF LiDAR in mobile robotics: A review," *arXiv:2202.11025v1 [cs. RO]*, [v1], <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.11025>. (Accessed 2022.2.22)
- 10) G. Kim, I. Ashraf, J. Eom, and Y. Park, "Concurrent firing light detection and ranging system for autonomous vehicles," *Remote Sens.* **13**, (1767) 1–24 (2021).
- 11) B. D. Padullaparthi, "Chap. 6, Automotive LiDARs," B. D. Padullaparthi, J. A. Tatum, and K. Iga (eds), *VCSEL Industry: Communications and Sensing*, 1st Ed., © IEEE Inc., Pub. by John Wiley & Sons, Inc. (2022).
- 12) ISO/SAE PAS 22736:2021, *Taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for on-road motor vehicles*, First Edition (2021).
- 13) M. Anderson, "The road ahead for self-driving cars. The AV industry has had to reset expectations, as it shifts its focus to Level 4 autonomy," *IEEE Spectrum*, News, 8 (2020).
- 14) H. Proff, T. Pottebaum, and P. Wolf, *Autonomous Driving. Moonshot project with quantum leap from hardware to software & AI focus*, Deloitte, Jan. 2019, https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/be/Documents/Deloitte_Autonomous-Driving.pdf (Accessed 2022.6.7)
- 15) M. Fitzgerald, "Automotive LiDAR: Rounding out the ADAS and autonomous driving sensor suite," Sept. 7, 2021, *Strategy Analytics*, p. 1 ~ p. 14, <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://china.xilinx.com/content/dam/xilinx/publications/press/xilinx-lidar-strategy-analytics.pdf> (Accessed 2022.6.7)
- 16) D. Bonte, D. Shey, J. Hodgson, R. Whitton, and D. Povlakis, "Demystifying LiDAR: IoT and automotive applications, industries, and business models," (ABI Research, New York, USA, 2021). pp. 1–31.
- 17) A. Debray and P. Boulay, "LiDAR for automotive and industrial applications 2021, Yole Development Market & Technology Report, September 2021," <https://s3.i-micronews.com/uploads/2021/09/YINTR21174-LiDAR-for-Automotive-and-Industrial-Applications-2021-Flyer.pdf> (Accessed 2022.6.12)
- 18) J. M. Eichenholz, S. R. Campbell, J. E. McWhirter, M. D. Weed, and L. A. Martin, "LiDAR system with polygon mirror," *US Patent Application Publication*, US 2020/0284906 A1 (2020).
- 19) G. Shi, L. Zheng and X. Xiao, *Laser measurement module and laser radar*, WO 2020/135802 A1, July, 2, 2020. (CN 111381239 A, July, 7, 2020, in Chinese).
- 20) E. Hegblom, Y. Zhu, G. Zhao, J. Yang, K. Zhuang, B. Kesler, L. Morales, M. Peters, and J. Skidmore, "Column-addressable and matrix-addressable multi-junction VCSEL arrays for all electronic-scanning LiDAR," *Proc. SPIE*, **12020**, 122007, 1–9 (2022).
- 21) S. Zhao, J. Chen, and Y. Shi, "All-solid-state, beam steering via integrated optical phased array technology," *Micromachines*.

- 13, 894, 1–15 (2022).
- 22) X. Sun, L. Zhang, Q. Zhang, and W. Zhang, “Si photonics for practical LiDAR solutions,” *Appl. Sci.* **9**, 4225, 1–25 (2019).
 - 23) X. Zhang, K. Kwon, J. Henriksson, J. Luo and M. C. Wu, “A large-scale microelectromechanical-systems-based silicon photonics LiDAR,” *Nature*. **603**, 253–258 (2022).
 - 24) S. J. Spector, “Review of lens-assisted beam steering methods,” *J. Opt. Microsystems.* **2** (1), 011003, 1–16 (2022).
 - 25) I. Kim, R. J. Martins, J. Jang, T. Badloe, S. Khadir, H. -Y. Jung, H. Kim, J. Kim, P. Genevet, and J. Rho, “Nanophotonics for light detection and ranging technology,” *Nature Nanotechnol.* **16**, 508–524 (2021).
 - 26) G. M. Akselrod, E. E. Josberger, and M. C. Weidman, “Laser scanning system, United States Patent Application Publication,” US 2018/0239021 A1 (2018).
 - 27) G. M. Akselrod, “Waveguide-integrated tunable liquid crystal metasurface device,” United States Patent Application Publication, US 2020/0371210 A1 (2020).
 - 28) G. M. Akselrod, P. P. Iyer, and R. D. Uthoff, “Lidar systems based on tunable optical metasurfaces,” United States Patent, US 11, 092, 675 B2 (2019).
 - 29) Quanergy, S3-2TM solid-state LiDAR for industrial applications, datasheet, 2020, https://quanergy.com/wp-content/uploads/2019/12/S3-2-Solid-State-LiDAR-for-Industrial-Applications_QPN-96-00087.pdf (Accessed 2022.6.16)
 - 30) Y. Li, B. Chen, Q. Na, Q. Xie, M. Tao, L. Zhang, Z. Zhi, Y. Li, X. Liu, X. Luo, G. Lo, F. Gao, X. Li, and J. Song, “Wide-steering-angle high-resolution optical phase array,” *Photonics. Research.* **9**, 2511–2518 (2021).
 - 31) R. Nicolaescu, C. Rogers, A. Y. Piggot, D. J. Thomson, I. E. Opris, S. A. Fortune, A. J. Compston, A. Gondarenko, F. Meng, X. Chen, and G. T. Reed, “3D imaging via silicon-photonics-based LIDAR,” *Proc. SPIE*, **11691**, 116910G, 1–11 (2021).



鷺尾邦彦

コンサルタント、パラダイムレーザーリサーチ代表

略歴：1968年東京大学理学系研究科物理学修士課程修了。同年、日本電気(株)入社。同社光エレクトロニクス研究所光基礎研究部長、同社レーザ装置事業部開発部長、同社制御システム事業本部主席技師長などを経て、2003年同社を定年退職。同年(有)パラダイムレーザーリサーチを設立し、取締役に就任。2020年同社解散に伴い、取締役辞任、同年、青色事業申告者としてパラダイムレーザーリサーチを開業、現在に至る。

学位：1980年東北大学工学博士。表彰等：レーザー学会フェロー、米国LIAフェロー、IEC 1906賞受賞、一般財団法人光技術振興協会功労者表彰(2021)。